



TITLE:

# 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2009, 22: 16-35

ISSUE DATE:

2009-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/108654>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科

##### 電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)

**電磁工学講座電磁エネルギー工学分野**

**電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)**

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野(大澤研)

##### 電子工学専攻

**集積機能工学講座(鈴木研) ☆**

**電子物理工学講座極微真空電子工学分野**

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

**電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)**

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研)

**量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)**

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

##### 光・電子理工学教育研究センター

**ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)**

**デバイス創生部門先端電子材料分野(藤田研)**

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

**知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)**

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

##### 通信情報システム専攻

**通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)**

**通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)**

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

**集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)**

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤研)

#### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

**システム情報論講座医用工学分野(松田研)**

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野

##### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(橋本研)

#### 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー (KU-VBL)

#### 産官学連携センター

研究戦略分野 §

注 § 工学研究科電子工学専攻橘研と一体運営

#### 高等教育研究開発推進センター

**情報メディア教育開発部門(小山田研) #**

#### 学術情報メディアセンター

ネットワーク研究部門ネットワーク情報システム研究分野(中村研)

## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/index.html>

## 「磁性体のベクトルヒステリシス特性のモデリング」

電気機器には高効率化・小型軽量化・高出力化あるいは高い環境適合性など多くのことが同時に求められるようになっており、これらの要求を低コストに実現するためには、高精度な計算機シミュレーションを用いて、材料の能力を可能な限り引き出した詳細な機器設計を行うことが必要です。しかし、電気機器の鉄芯材料である電磁鋼板はベクトル磁気ヒステリシス特性など複雑な磁気特性を持ち、これを考慮した電気機器の電磁界解析は容易ではありません。このため、磁気飽和のみを考慮した解析の後、ヒステリシス損や異常渦電流損などを経験的な算出式を用いて後处理的に求めることが通常で、このことが、電気機器の電磁界解析の高精度化の妨げとなっています。そこで、本研究室では、電磁鋼板の複雑な磁気特性の効率的で正確なモデル化手法の開発に取り組んでいます。ここでは以下、ベクトルヒステリシス特性のモデル化に関して述べます。

図1は、ベクトルヒステリシス特性の一例で、回転する磁束密度ベクトル  $\mathbf{B}$  (図1 (a)) に対する、磁界ベクトル  $\mathbf{H}$  (図1 (b) (c)) の変化を示しています。異方性により  $\mathbf{H}$  の軌跡は円になっていません。また、ヒステリシスのため回転方向によって  $\mathbf{H}$  の軌跡が異なり、 $\mathbf{H}$  の位相が  $\mathbf{B}$  より進んでいます。回転機器内ではこのような回転磁束が生じることが一般的なので、 $\mathbf{H}$  と  $\mathbf{B}$  の両ベクトル間のヒステリシス特性を表現するモデルが必要になります。図2は、無方向性電磁鋼板 (JIS: 35A300) の回転ヒステリシス特性をベクトルプレイモデル<sup>[1]</sup>で表現した結果です。回転ヒステリシス損失は、鉄芯が飽和に近づくにつれて減少するのが特徴ですが、ベクトルモデルにより精度よく表現されています。

## 参考文献

- [1] T. Matsuo, "Rotational saturation properties of isotropic vector hysteresis models using vectorized stop and play hysterons," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 3185-3188, Nov. 2008.

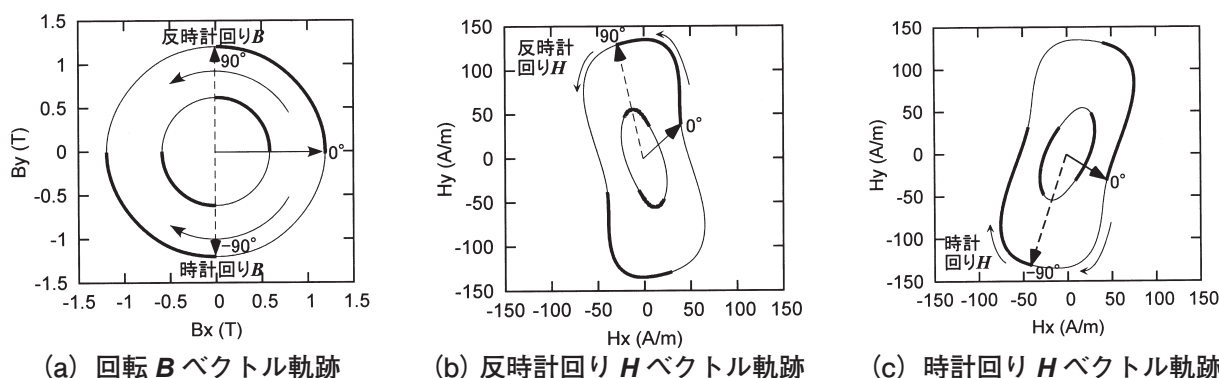


図1 ベクトルヒステリシス特性の例 (太線は  $B_x B_y > 0$  の部分, 細線は  $B_x B_y < 0$  の部分)

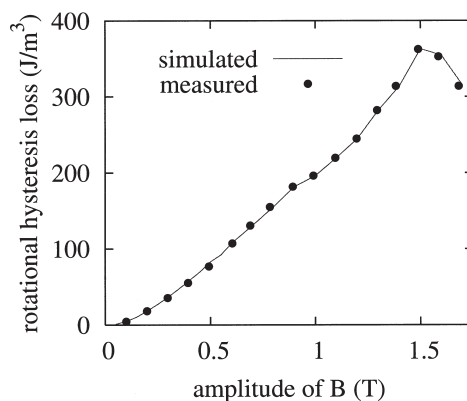


図2 回転ヒステリシス損

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「超伝導電力ケーブルの交流損失低減」

超伝導電力ケーブルは、抵抗がゼロであるという超伝導の特徴をいかした低損失・大容量・コンパクトな電力ケーブルであり、高温超伝導材料を使った電気機器の中でも、もっとも実用化が近いと期待されている機器です。日本、米国、EU、韓国、中国において、数百メートルからキロメートルの長さの超伝導電力ケーブルの研究開発プロジェクトが進行中、あるいは計画中であり、その一部は、実際の電力システムに導入され需要家への送配電の実証が行われています。今、この時期に、超伝導ケーブルの研究開発が活発に行われている背景には、地球環境問題に関連してエネルギー利用の高効率化への要請が世界的に高まっていること、20余年前の高温超伝導フィーバーの時代に発見されたセラミック系の脆い超伝導物質を複合加工し柔軟性を持った長い電線（高温超伝導線）を製造する技術が近年になってようやく確立してきたことなどがあります。

超伝導電力ケーブルには交流ケーブルと直流ケーブルがあります。直流ケーブルも太陽光発電、風力発電などの電力を輸送する手段として最近注目されていますが、既存の電力システムへの導入を考えた場合には交流ケーブルに対するニーズが高く、実際、世界における多くの研究開発プロジェクトのほとんどが交流ケーブルを対象としたものです。しかし、超伝導体も交流で用いると、超伝導体の内部に量子化して侵入した磁束（磁束量子線）が、電流の時間的変化に伴いピン止め力という力に抗してローレンツ力によって動かされることによって、交流損失という損失を発生してしまいます。この交流損失は絶対値としては大変小さなものですが、低温領域で発生するため、冷却に必要な機器の効率を考慮すると無視できるものではなく、交流損失の低減が超伝導電力ケーブルの実用化のひとつの鍵とされています。

我々の研究室では、超伝導電力ケーブルのアーキテクチャと超伝導ケーブルを構成するテープ形状をした高温超伝導線の特性に着目し、どのような断面アーキテクチャにすれば交流損失を低減できるか、交流損失低減の観点からはどのような高温超伝導線の特徴が要求されるかといったテーマについて研究を行っています。大学の単独の研究室としてはかなり大規模な部類にはいる計算サーバを用いた電磁現象シミュレーションと、これまで培ってきた実験技術に基づいた交流損失測定を統合したアプローチにより、超伝導電力ケーブルの交流損失特性を解明しその低減指針の確立を目指した研究を進めています。

尚、本研究室は、NEDOによるイットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトに主要な大学メンバーとして参画しており、本研究のその中で民間企業等との共同研究として実施しているものです。

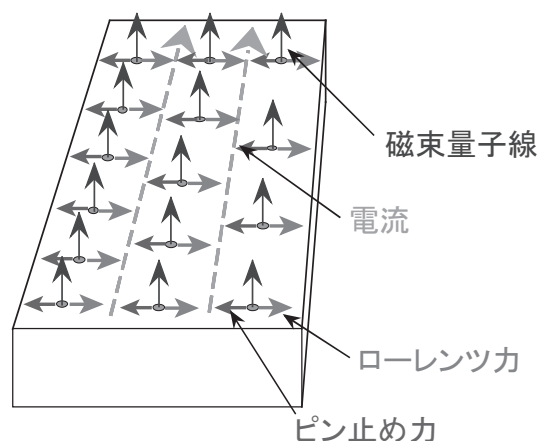


図1 磁束量子線、ピン止め力、ローレンツ力

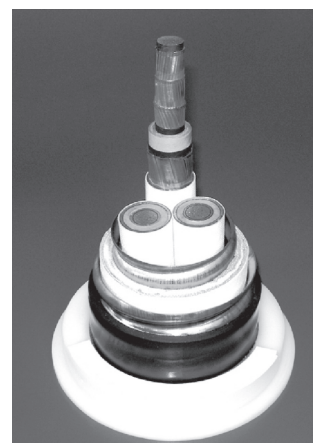


図2 超伝導ケーブルの断面模型



## 電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野（引原研究室）

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## SiC パワーデバイスの回路実装：高周波スイッチング駆動

ワイドバンドギャップ半導体 SiC の物性からデバイス開発に至る成果は京都大学の電子物性分野の世界的な成果として知られている。その基礎的な成果を元に、ここ数年漸く国内外の企業によりデバイスが製品として市場に出されるに至っている。しかしながら、電力変換は SiC パワーデバイスだけで達成されるものではない。パッケージング、放熱処理、回路実装、制御のための信号処理、そしてドライブ技術がバランス良く開発されて初めてデバイスの特性が生かされる。SiC パワーデバイスに関してみると、その回路実装に関する研究は漸く緒についたばかりである。SiC パワーデバイスは、Si に対してオン抵抗が小さく、スイッチング速度が速い、耐圧が高い、高温耐性が高いという物性的優位性がある。しかしながら、現在のデバイスの開発は、市場では従来の Si 系デバイスの置換え需要が意識されているが、その物性としての優位性を生かすための回路開発への努力は必ずしも熱心とはいえない。本来デバイス開発の研究者が従来の置換えデバイス開発の状況に満足せず、デバイスの特性を生かす回路を意識してこそ可能になる技術も在る。現状はとても満足いくものではない。

本研究室では、21 世紀 COE プログラムにおいて電気系の連携として SiC パワーデバイスの回路応用に関する研究を始め、まず、高温環境での駆動の可能性を検討した。その結果、450℃ という高温環境でデバイスの駆動を確認し、400℃ でコンバータの変換動作を示した。GCOE では、次に上述の温度がスイッチングロス之余裕度であることから、SiC 能動素子の高周波駆動を試みた。Si の FET などのゲート駆動は、今では Si 素子の限界である数百 Hz 程度で駆動が可能なフォトカップラやドライバー IC によっている。しかしながら、本研究では SiC パワーデバイスのために新たにゲートドライブの方式を開発することが必要になる。新たな方式の開発の結果、SiC-JFET を図 1 の様に、数 MHz のスイッチング周波数で、かつ疑似 Normally-off 動作で駆動することに成功した。また小容量のコンバータにより動作確認も行っている。さらには、この周波数でソフトスイッチングを実現することで、スイッチング損失を下げることも示した（図 2）。これらは、デバイス技術に回路設計技術がうまくかみ合わなければ実現できない。

パワーデバイスが数 MHz 以上で駆動できた時、変換器には新しいパラダイムが生まれる。同じ容量ならばインダクタンス、キャパシタンスを小さくすることができることから、電源回路の主要な面積を占めるこれらの受動素子や放熱フィンなど小型化ができる。さらに、単なる電力変換の目的以上に変換を利用できる可能性が生まれる。

## 参考文献

- [1] T. Funaki, T. Kimoto, and T. Hikiyara, Evaluation of High Frequency Switching Capability of SiC Schottky Barrier Diode, Based on Junction Capacitance Model, IEEE Trans. on PE, Vol.23, No.5 (2008).
- [2] 宅野嗣大, 引原隆士, SiC JFET のゲートドライブ回路とスイッチング特性, 電気学会産業応用部門全国大会, 1-128, 2008 年 8 月 29 日.
- [3] 宅野嗣大, 引原隆士, SiC-JFET を用いた E 級電力増幅回路に関する実験的検討, 電気学会全国大会, 4-149, 2009 年 3 月 17 日.

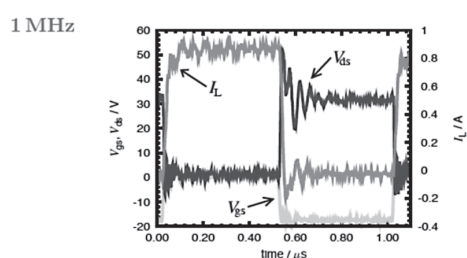


図 1 高周波ハードスイッチング

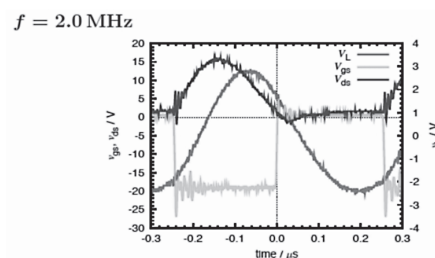


図 2 ソフトスイッチングの達成

## 電子物理工学講座 極微真空電子工学分野

[http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index\\_j.html](http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index_j.html)

## 「PVD 法による遷移金属窒化物薄膜の形成と真空電子デバイスへの応用」

周期律表の第4族、第5族の遷移金属の窒化物は、窒化チタン (TiN)、窒化バナジウム (VN) に代表されるように、化学的に安定で、硬度が高く、高融点、更に抵抗率も比較的低いことが知られている材料です。これらの材料は、従来から硬質皮膜や半導体デバイスのバリアメタルなどとして利用されてきました。当研究室では、この遷移金属窒化物の持つ特徴が、冷陰極材料が備えるべき性質と合致していることに着目し、電界放射陰極の材料として検討を進めてきました。具体的には、これら材料の仕事関数等の物性評価とデバイス形成の可能性検討です。本稿ではこれまでに得られた成果について紹介します。

上記の遷移金属窒化物を形成するためには通常、1000℃程度の高温を必要とします。我々は低温で化合物薄膜形成が可能な、スパッタリング法やイオンビームアシスト蒸着法などの物理的气相成長 (Physical Vapor Deposition: PVD) 法を用いてこれらの薄膜をシリコン基板上に形成しました。遷移金属窒化物薄膜のうち、どの材料が最も冷陰極材料として適しているかを検討するために、第4周期から第6周期にいたる遷移金属窒化物の薄膜を形成し、これらの薄膜の仕事関数をケルビン法により測定しました。

マグネトロンスパッタ法により作製した薄膜の仕事関数の値を図1に示します。仕事関数は、TiN や VN など軽い金属の窒化物では高く、窒化ハフニウム (HfN) や窒化タンタル (TaN) で低くなることが明らかとなりました。仕事関数は若干の窒素組成の変化に対してはあまり大きな依存性を持たず、金属材料が決まればほぼその値が決まっています。

HfN や TaN を陰極とする微小な電界放射型の真空電子デバイスの作製も試みました。シリコン基板を反応性イオンエッチングを用いて加工し、円錐状のコーンが並んだアレイを形成しました。その上から薄い遷移金属窒化物薄膜を形成し、さらに絶縁膜、ゲートとなる金属膜を形成しました。最後にコーン先端部分の金属膜と絶縁膜を除去して真空電子デバイスとしました。HfN を用いると絶縁層の特性もよく、良好な電子放出特性を示すデバイスを作製できることが明らかとなりました。図2に作製した真空電子デバイスの電子顕微鏡写真を示します。

最近では、この真空電子デバイスを高温や放射線照射化などの過酷環境下でも利用できるデバイスとするべく、高温度での電子放出特性の確認や、能動デバイスとしての特性の評価へと進展しています。また、遷移金属窒化物の更に進んだ薄膜物性評価にも力を入れています。

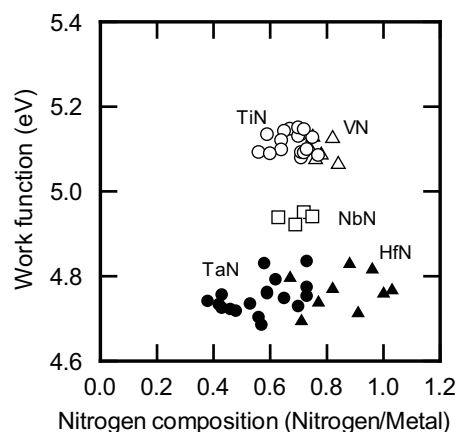


図1. 仕事関数の窒素組成依存性

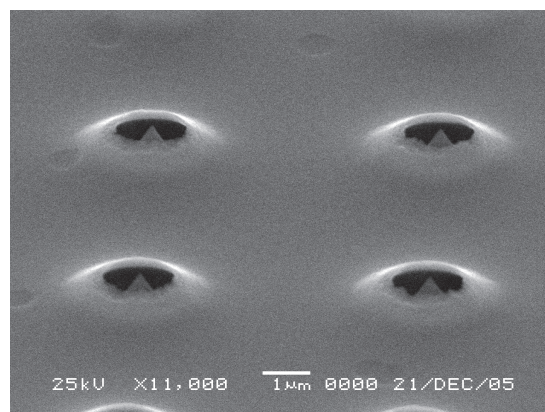


図2. HfN 電子源の走査電子顕微鏡像

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野（木本研究室）

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「SiC を用いた高耐压横型 MOSFET の作製」

集積回路や電力変換素子を牽引してきた Si デバイスは、素子の発熱や電界強度の増大により材料固有の物性に起因する性能限界が顕在化してきている。広い禁制帯幅を有する半導体、特にシリコンカーバイド (SiC) は、数々の優れた物性を有することから次世代の低損失パワーデバイス、高周波デバイス、高温動作デバイス用材料として極めて有望である。SiC パワー MOSFET は耐压 600 ~ 3000V の領域で最も有望なパワーデバイスであり、現在はディスクリートの縦型 MOSFET の研究開発が進められている。SiC パワーデバイスも将来的には、駆動回路や制御回路との一体化が進められ、高機能パワー集積回路 (IC) のニーズが高まると予測される。このような素子実現には、集積化に適した横型のパワー MOSFET が有望と考えられる。本研究では、将来の高耐压パワー IC を目指した横型 SiC RESURF (REduced SURface Field) MOSFET の作製と特性向上を行った。

図 1 に本研究で作製したダブル RESURF MOSFET の断面構造の模式図を示す。本研究では、超接合構造の一種として、RESURF 領域の表面に p 型層を設けたダブル RESURF MOSFET を新たに作製した。ダブル RESURF 構造では、RESURF 領域 (n 型) / p 型成長層界面だけでなく、表面 p 型層 / RESURF 領域界面からも空乏化が進むため、RESURF 領域のドーピング密度を上げることが可能であり、オン抵抗の低減に有効である。RESURF1 領域、RESURF2 領域は N のイオン注入、表面 p 層は Al のイオン注入により形成した。RESURF1 領域、RESURF2 領域の各ドーズ ( $D_{RES1}$ 、 $D_{RES2}$ )、および表面 p 領域のドーズ ( $D_{TP}$ ) を広い範囲で変化させ、シミュレーションと実験の比較を行った。ダブル RESURF MOSFET の耐压は実効 RESURF1 ドーズ ( $D_{RES1} - D_{TP}$ ) と実効 RESURF2 ドーズ ( $D_{RES2} - D_{TP}$ ) に依存することを明らかにした [1]。ゲート酸化膜 (膜厚約 80 nm) は  $N_2O$  酸化 (1300°C) で形成した。チャネル移動度は約  $35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  である。

図 2 に作製した 2 ゾーンダブル RESURF MOSFET の出力特性を示す。ドリフト長が  $20 \mu\text{m}$  のデバイスではゼロゲートバイアスで耐压 1580 V、酸化膜電界が  $3 \text{ MV}/\text{cm}$  のときのオン抵抗  $40 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  という優れた特性を示した。しきい値電圧は  $2.8 \text{ V}$  のノーマリオフ特性である。ドリフト長が  $10 \mu\text{m}$  のデバイスでは耐压  $1000 \text{ V}$ 、オン抵抗  $30 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  の特性が得られた (図示していない)。本研究で作製した MOSFET では、 $V_B^2/R_{ON}$  で表される性能指数として  $33 \sim 62 \text{ MW}/\text{cm}^2$  という値が得られた。これは、これまでに報告されたあらゆる横型 MOSFET の中で最高の特性である [2]。

[1] M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto, IEEE Trans. Electron Devices Vol.54 (2006), pp.1216-1223.

[2] M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto, IEEE Electron Device Lett. Vol.30 (2009), in press.

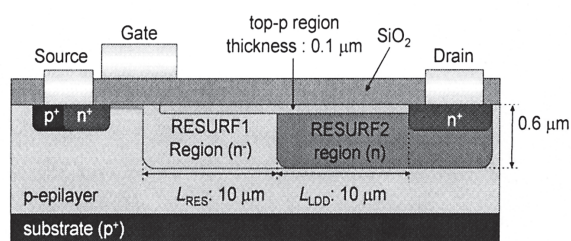


図 1 作製した SiC RESURF MOSFET の構造

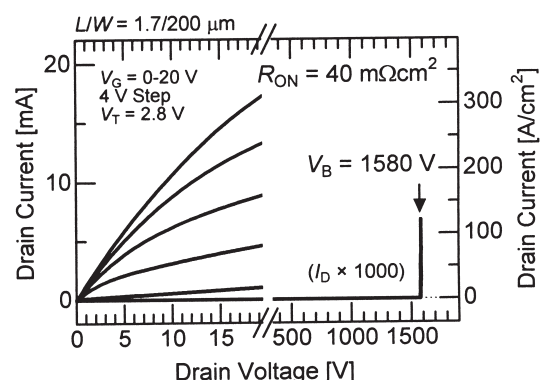


図 2 作製した SiC RESURF MOSFET の特性



## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「近接場分光法を用いた InGaN 系発光素子におけるキャリア再結合過程の解明」

InGaN 系量子井戸を発光層とした青色発光ダイオード (LED) が実用に至ってから、すでに 15 年以上たちますが、いまだその発光機構は議論の対象となっています。というのも、InGaN 系量子井戸には、従来の例えば GaAs を中心とした発光素子よりも 4 桁以上も高い密度の貫通転位 ( $>10^9\text{cm}^{-2}$ ) が存在するにも関わらず、それを用いた青色 LED の外部量子効率約 75% (内部量子効率は約 90%) と非常に高い値を実現しているため、この背景にあるメカニズムが多くの研究者の興味を集めているからです。この機構を解明するために、我々のグループの報告 (被引用回数 600 回以上) を皮切りに、InGaN 中に形成されたナノ局在中心に関する議論が非常に活発になされてきました。しかしながら、透過電子顕微鏡の観察中に生じる In クラスタリングや、カソードルミネッセンス測定におけるキャリア拡散の問題などのために、議論は百家争鳴の状態でした。このことから、当研究室では、ナノ構造と光物性の相関を非破壊で評価する測定手段が非常に重要であると考え、精力的な研究を展開してきました。我々の開発した、マルチモード近接場分光法は、波長、空間分解測定手法であり、さらに超高速レーザと組み合わせることで、波長・時間・空間分解を実現する究極の測定ツールであり、発光中心、非発光中心、キャリア拡散長やキャリアの再結合ダイナミクスを nm スケールかつ非破壊で直接同定することができる新たな評価手法です。

図 1 に、一例として近接場光学顕微鏡 (SNOM) で観察した青色発光 InGaN 量子井戸の光励起発光 (PL) 特性を示しました。図 1 (a) は PL 強度マッピング像、(b) は発光強度の弱い A 領域、強い D 領域、および発光の強い領域と弱い領域の境界である B、C 領域において測定したスペクトルです。発光強度が強い D 領域では、発光ピークエネルギーが低エネルギー側にある傾向が強く、局在中心からの発光を示しています。一方、発光強度が弱く、非発光再結合中心が多いと予想される A 領域では、発光は高エネルギー側に位置しています。これに対して、境界領域 B、C では二つの発光ピークに分離していました。これらのことから、非発光再結合中心の周りで組成変調が生じてそれがポテンシャル障壁として働き、非発光再結合中心への捕獲が抑制されていること、そしてそれが高効率発光の有力な機構となっていることが見出されました。同様の測定を、緑色発光素子や紫外発光素子にも展開し、波長フロントの拡大にも貢献しています。

参考文献：A. Kaneta, M. Funato, and Y. Kawakami, *Phys. Rev. B* **78**, 125317 (2008).

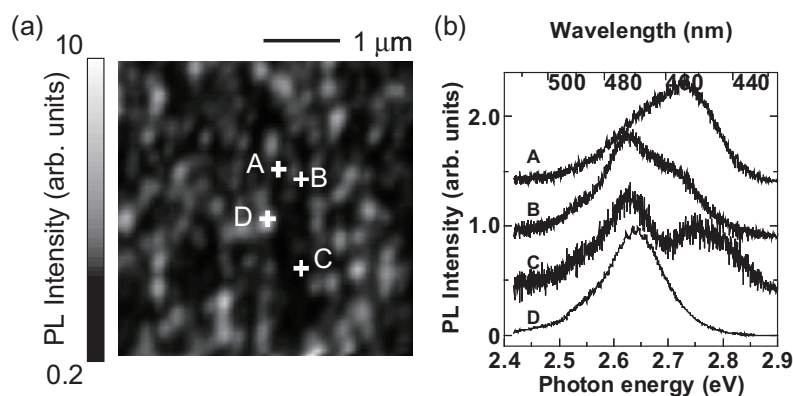


図 1 (a) 青色発光 InGaN-QW の SNOM-PL 強度マッピング像  
(b) A ~ D において測定された PL スペクトル



光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス部門 ナノプロセス工学分野 (高岡研究室)  
[http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess\\_eng/index.html](http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html)  
 「エタノールクラスターイオンビームを用いたシリコン基板の低損傷加工」

我々が日常生活で目にする電気・電子機器の多くには集積回路 (IC) が用いられています。IC の多くはシリコン基板上に作られています。その開発以来、加工パターンをより微細化することにより集積度や計算速度の向上がなされています。しかし、最近、基板への照射損傷や製造工程の複雑化による歩留まりの低下等により、これまで実現されていた IC の高性能化が緩やかになっています。このため、均一で高い再現性を持ちかつ低損傷な表面加工法が求められています。さらに、地球温暖化を抑制するために温室効果ガスを使用しない表面加工法が求められています。一方、液体クラスターイオンビームを用いた表面加工法は従来のウェットプロセスの限界を打破する表面プロセスとして注目されています。本稿では、シリコン基板とエタノールクラスターイオンビームとの相互作用についての研究を紹介します。

エタノールクラスターは数千個のエタノール分子が分子間力によって凝集したものです。クラスターソースにエタノールを導入し、ヒーターで過熱することにより蒸気圧を高め、超音速ノズルを通してエタノール蒸気を真空中に噴射すると、エタノールクラスターが生成されます。生成されたエタノールクラスターに 200 eV 程度に加速した電子を照射し、イオン化します。生成したクラスターの速度が一定であるとする、クラスターの運動エネルギーはクラスターを構成する分子の数 (クラスターサイズ) に比例します。この現象を利用すると、減速電圧を印加することによりクラスターイオンビームから小さなサイズのクラスターイオンやモノマーイオンを除くことができます。図 1 にエタノールクラスターイオンビーム照射によるシリコン基板のスパッタ深さの加速電圧 ( $V_a$ ) 依存性を、図 2 にその際の変位原子数の減速電圧 ( $V_r$ ) 依存性を示します。エタノールクラスターイオンビームによるスパッタ率は通常のアルゴンビームの 100 倍以上と極めて高く、変位原子数 (照射損傷) は小さいものでした。また、減速電圧の増加により変位原子数を少なくすることができ、条件によっては無損傷の照射が可能になります。この様に、モノマーイオンビーム照射ではトレードオフの関係にある、高スパッタ率・低照射損傷の表面加工を実現できることが分かりました。

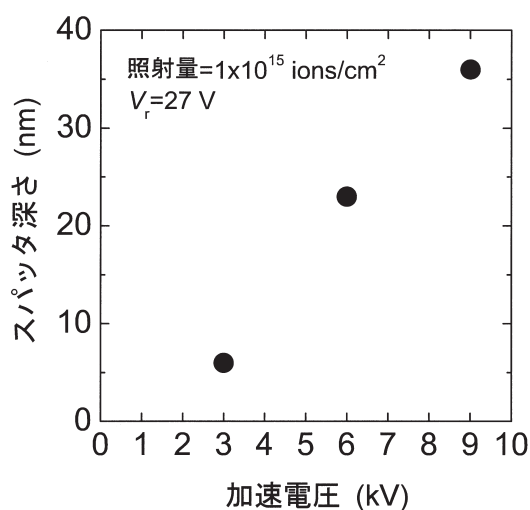


図 1. スパッタ深さの加速電圧依存性

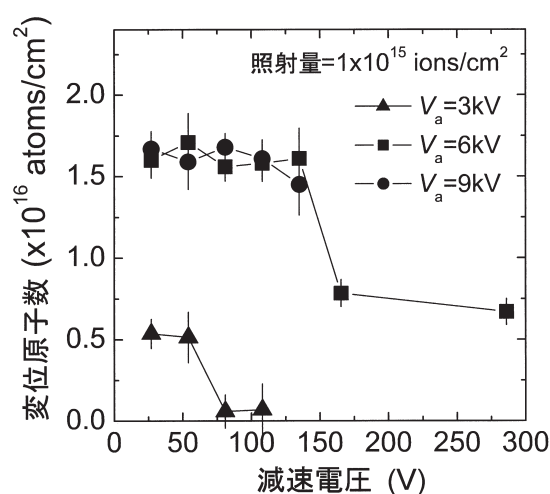


図 2. 変位原子数の減速電圧依存性

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野(藤田研究室)  
<http://cib.kuee.kyoto-u.ac.jp/ematerial/>  
 「酸化物半導体の世界を拓く」

多くの元素は酸素と化合して酸化物となる。それゆえ酸化物には多くの種類があり、それだけ多くの機能を持つ。また多くの元素にとって酸化物は最も安定な形態の一つで、製造コストや環境負荷の点で優れている。電気・電子工学の分野でも酸化物は圧電体、誘電体、磁性体、絶縁体、透明導電体、超電導体など多様な分野で用いられている。ところが酸化物が半導体として用いられることはほとんどなかった。これは、半導体として求められるレベルの組成制御、構造制御、電子物性制御が困難なためであった。しかし GaAs や InP 等半導体の結晶成長に用いられている高度な成長技術を用いることにより、半導体としての性質を示す酸化物が得られるようになり、環境に優しい材料であるとともにその多様性ゆえに、新しい原理に基づく光・電子デバイスの基盤材料として注目されている。一つの代表が ZnO であり、紫外発光・受光デバイス、高周波デバイス、フラットパネルディスプレイ駆動用 TFT、スピントランジスタ等への期待が寄せられている。実は現在のスタンダードな半導体成長技術である有機金属気相成長 (MOCVD) による ZnO の成長は 1982 年に電子工学教室川端研究室から報告され [1]、分子線エピタキシ (MBE) による成長は 1995 年に筆者 (藤田) がノースカロライナ州立大学滞在時に成功しており [2]、半導体応用を目指す酸化物半導体研究の礎が本電気系教室にあることは注目すべきである。

われわれの研究室では、多様な酸化物半導体の機能を開拓する観点で研究を行っている。最近になって注目しているのが  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  半導体である、この半導体は禁制帯幅約 4.8eV (波長 260nm) の直接遷移型のバンド構造を持ち、その基板が開発されているという大きな利点がある。基板表面の熱処理により空孔が少なく分子ステップを持つような平坦面が得られるため、これを利用したショットキー型光検出器を試作した。この光検出器は波長 260 nm 以下の光に感度を持つため、自然界に存在する光に影響されことなく深紫外光の検出が可能である。図は蛍光灯照明下で炎に含まれる深紫外光を検出しているところである。また MBE により基板上に  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 、 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$  ( $x < 0.4$ ) 半導体が分子層ステップを保った layer-by-layer 成長をする。これは今後多層構造による光・電子デバイスへの進展が可能なことを意味し、ワイドギャップであるが故の高い絶縁破壊電界に期待すれば、コストに優れたパワーデバイスへの応用などが考えられる。

さらに  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  半導体をベースに、コランダム構造を持つ  $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  混晶半導体系の物性探索を行い、光・電子物性と磁性の相互作用を持つ新しい酸化物半導体の発現とデバイス応用を目指している。

[1] M. Shimizu, T. Horii, T. Shiosaki, and A. Kawabata: Thin Solid Films **96** (1982) 149.

[2] M.A.L. Johnson, S. Fujita, W.H. Rowland, Jr., W.C. Hughes, J.W. Cook, Jr., and J.F. Schetzina: J. Electron. Mater. **25** (1996) 855.



図  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  深紫外光検出器により蛍光灯照明下で炎の検出を行っているところ。

## 知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

<http://nlp.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 「大規模ウェブテキストを用いた語の類似度計算」

近年、ウェブをはじめとする大規模テキストから知識を獲得し自然言語解析に適用することにより、解析性能が大幅に向上しています。獲得できる知識としては様々なタイプのものがありますが、ここでは語の類似度計算について取り上げます。一般に、語の類似度は人手で整備されたシソーラスを用いて計算されます。しかしシソーラスにはカバレッジが低いことや一貫性を保つことが難しいといった問題があることから、大規模テキストを用いて、「似た語は似た文脈で出現する」という仮説に基づいて語の類似度を計算することを行ないました。例えば、「医者」と「医師」という2語は、どちらも「～に診せる」、「～を開業する」といった文脈で出現することから、類似していると判断することができます。

まず、大規模ウェブテキスト（日本語1億ページ、16億文）に対して係り受け解析を行ないます。そこから、名詞、助詞、動詞の3つ組を抽出し、助詞と動詞をペアとしたものを名詞の文脈とみなします。例えば、「子供を医者に診せた」という文からは、名詞「子供」に対して文脈「～を診せる」、名詞「医者」に対して文脈「～に診せる」を得ます。得られた文脈を名詞ごとに集約し、各名詞をベクトルで表現します。そして、2語の類似度を、2つのベクトルの類似度と定義します。

語の類似度計算手法を、相澤が構築した評価セット [1] を用いて評価しました。この評価セットは2つのタスクからなり、以下の手順で作られています（図1）。まず、「AやBなどのC」というパターンに合うものを大規模テキストから収集します。タスクIは、AとBを類義語とし、Aとシソーラスで異なるカテゴリに属している語Dを選び、非類義語とします。タスクIIは、A、BとCが上位下位関係にあるかどうかを手手で判断します。図1にあるような「○」と「×」を正しく判定できるかどうかによってシステムを評価します。

この評価セットを用いて、類似度計算の評価を行なったところ、タスクIではF値0.98、タスクIIではF値0.88といった高い精度を達成することができました。また、類似度計算に利用するテキストのサイズを変更したところ、図2のように大規模にすればするほど精度が向上し、16億文あたりで精度が飽和することを確認しました。

当研究室ではこれまでに、「誰が何をどうした」という知識である格フレームを自動構築することに成功しました。格フレーム構築では、動詞の用法を区別するために語の類似度を用いてクラスタリングしています。以前は語の類似度計算にシソーラスを用いていましたが、上記で計算した語の類似度を利用することにより、以下のようにシソーラスにない語を含む格フレームを構築することができました。

焼く:1 {私, 主人, …} が {パン, ケーキ, …, バームクーヘン, …} を 焼く

焼く:2 {ファイル, 曲, 音楽, …} を {CD, DVD, CDR, …} に 焼く

#### 参考文献

- [1]: 相澤彰子. 大規模テキストコーパスを用いた語の類似度計算に関する考察. 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.3, pp.1426-1436 (2008)

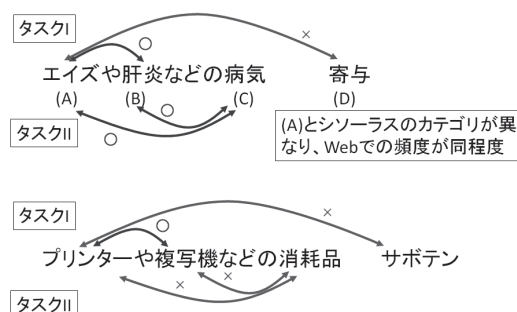


図1. 相澤が構築した評価セット

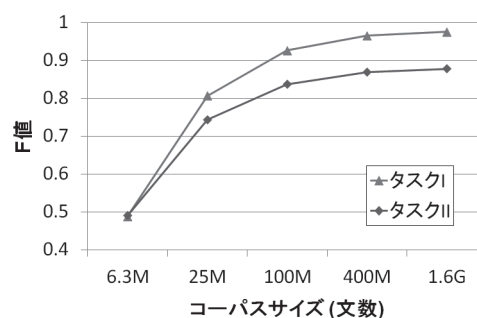


図2. F値とコーパスサイズの関係



## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室）

<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「協力中継の無線ネットワークへの導入に関する課題の検討」

携帯電話ネットワークや無線 LAN は、現在の社会を支える不可欠なインフラとなりつつある。これら無線ネットワークにおける伝送は多くの場合、有線ネットワークに接続された基地局やアクセスポイントと呼ばれる無線局と端末間の直接伝送であり、カバーエリアを抜本的に改善しようと考えたとき、無線中継伝送（マルチホップ伝送）が一つの解となりうる。マルチホップ伝送機能を有する中継局をネットワーク内に導入できれば、有線ネットワークに接続することが難しい場所にも、無線ネットワークの導入が可能になると考えられる。携帯電話システムの 3GPP、無線 MAN の IEEE802.16、無線 LAN の IEEE802.11 といった代表的な標準化組織すべてにおいて、マルチホップ伝送を用いる無線ネットワークの標準化が進んでいる。今後標準規格に則った製品が市場に登場すると考えられ、産業界で注目度の高い技術である。

このマルチホップ伝送の特性を向上させる手段として、協力中継が考えられている。これは、図 1 において発呼局（S）と中継局（R）からの信号、あるいは複数の中継局からの信号を宛先局（D）においてダイバーシチ合成する伝送方式である。協力中継を行う場合の受信信号電力は、直接伝送およびマルチホップ伝送と比較して増大可能であるため、孤立した直接伝送やマルチホップ伝送を協力中継に切り替えることで必ず通信品質を向上させることが可能である。

一方、無線ネットワークを構築するにあたっては、限られた資源である無線周波数を地理的に繰り返し使用することが重要である。協力中継は方式によっては干渉源の数を増加させるため、周波数繰り返し効率がよく行えないことが危惧される。そこで図 1 のように干渉によってネットワークの特性が制約される状況下の協力中継の特性を評価し、発呼局の空間的な同時送信密度が上がるにつれ、直接伝送、協力中継、マルチホップ伝送と切り替えることで高い周波数利用効率を得られることを明らかにした [1]。

また、無線ネットワークにおいては確認応答などのために双方向に通信を行うことが多い。直接伝送やマルチホップ伝送においては、ある方向の伝送と逆方向の伝送では送信アンテナと受信アンテナが逆となるため、双方向通信の容量の間に対称性が成り立つ。この一方、協力中継では送信アンテナ群と受信アンテナ群が逆とならないため、多くの場合に対称性が成り立たない。この非対称性が現れる条件を明らかにし、図 2 のように伝送を行う方向を適応的に切り替えることで高い周波数利用効率を実現できることを明らかにした [2]。現在は双方向通信の間の公平性を保証するスケジューリングなどに関して検討を進めている。

- [1] Koji Yamamoto, Hirofumi Maruyama, Takashi Shimizu, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Spectral efficiency of fundamental cooperative relaying in interference-limited environments," IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 8, pp. 2674-2682, Aug. 2008.
- [2] 佐伯高明, 山本高至, 村田英一, 吉田進, "半二重協力中継における非対称性に着目した送信方向切り替え方式の検討," 電子情報通信学会技術報告, RCS2008-125, pp. 135-139, Oct. 2008.

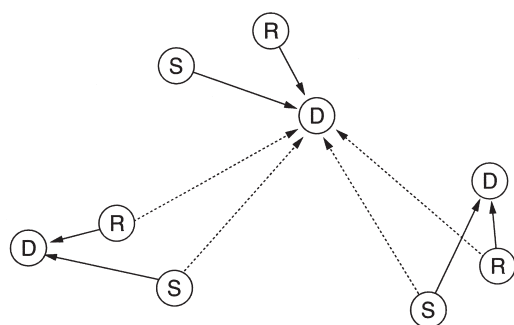


図 1. 発呼局と中継局から同時に送信を行う協力中継図

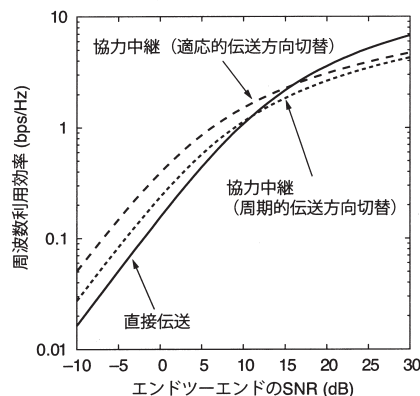


図 2. 双方向協力中継における適応的伝送方向切り替えの効果



## 通信システム工学講座 伝送メディア分野 (守倉研究室)

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「高速移動体への大容量通信を可能にする適応等化器の研究」

移動無線の大容量化は驚くべきスピードで進んでいる。1992年にデジタル移動通信システムがサービスされたときには9.6kbpsだった伝送容量は、2～3年後には200Mbps程度にまで高速化される予定である。このような大容量通信を移動無線環境で行うと、電波の反射・回折に起因したマルチパスフェージングが発生する。即ち、これからの移動無線システムではマルチパスフェージング対策が必須となる。幾つかの対策法があるが、なかでも適応等化器はマルチパスフェージングに対する有効な手段として古くから知られており、無線中継系や移動無線に適用されてきた。そこで、我々は上記のような大容量無線システムには、簡易な処理で実現できるFFT (Fast Fourier Transform) を利用した適応等化器 (FFT 等化器) が適していると考え、研究を進めている。但し、端末の高速移動に伴い、通信環境が大きく変動する場合、FFT 等化器は特性を著しく劣化させる。端末を携帯できることが利点の移動通信システムにおいて、高速移動に伴う特性劣化は大きな課題となる。そこで我々はこの課題を解決する上で重要な次の現象を見出した。通信環境の変化によりFFT処理される各々の信号の周波数特性が時々刻々と変化する場合、ある瞬間の周波数特性を用いてFFT等化を行うと、等化器出力においてはその瞬間に受信された信号の品質が最も高くなる。至極当然の響きがあるが、我々はこれが1FFT処理ないでも成立することを見出した。そこで、FFT等化器を複数用意し、各々異なった瞬間の周波数特性を利用して等化を行い、その出力を選択合成することで等化特性の大幅な改善が可能になることを明らかにした[1]。図1にその構成を示す。本提案等化器では更なる特性改善のため、誤り訂正復号器と、その復号結果に基づき高速移動に伴う劣化要因を除去する歪補償機を備えている。図2にそのビット誤り率特性を示す。図2に示すように、従来のFFT等化器では約 $10^{-1}$ にフロア誤りが発生しているが、提案の等化器を用いることで、ビット誤り率を3桁程度低減できている。今後は本方式を、上記の高速移動無線通信システムに適用した場合の特性を評価して行く。

- [1] 橋本、田野、梅原、守倉、“高速フェージング伝送路のための並列FFT等化”、信学論 (B) Vol.J92-B, No.3, pp.1174-1184, 2009

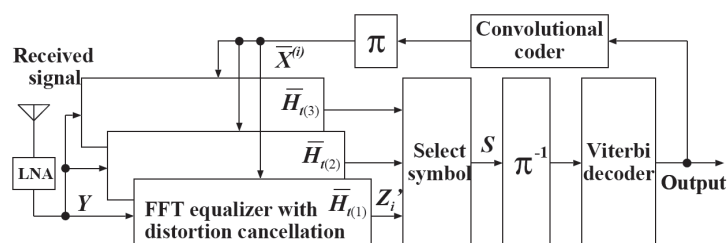


図1 提案する等化器の構成

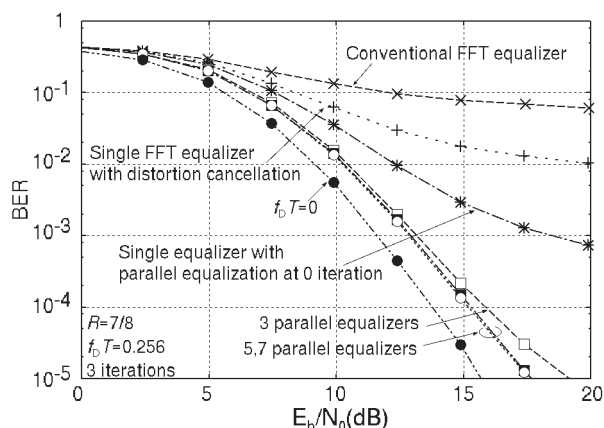


図2 BER 特性

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研究室）

<http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 集積回路の特性ばらつき評価技術

高度情報化社会を支える基幹デバイスである集積回路は、多大な研究開発努力により微細化、大規模化、高機能化が図られてきました。しかし、デバイスの寸法がナノスケールに向かう現在、微細化に伴う各種の物理限界が顕在化しています。すなわち、ドーパントの原子レベルの配置位置ばらつきや、デバイス構造の原子レベルの凸凹により、微細デバイスの動作特性には本質的にばらつきが存在します。ゲート絶縁膜も物理限界近くまで薄膜化され、動作に伴う特性や信頼性の劣化も深刻になっています。当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。ここでは、特性ばらつきを評価する技術について説明します。

集積回路の特性ばらつきは、各種の要因が重なって発生しています。そのため、実際のシリコン上で発生しているばらつきを評価し、その成分分離やモデル化を行うことが必要です。そこで、多数のリング発振回路（RO）をアレー状に配置したテスト回路を開発し、実チップにおけるばらつき特性を実測しました。90nm プロセスで設計試作した回路を図1に示します。本回路により、チップ内におけるばらつきを、約  $50\mu\text{m}$  の空間分解能で観察できます。評価結果を図2に示します。図2左上は、チップ上での発振周波数分布です。チップ内ばらつきの標準偏差は1.6%でした。このばらつきを、確定的成分（図2左下）、大域的成分（図2右上）、ランダム成分（図2右下）の三者に分離しました。ここで、確定的成分とは、チップ上の場所に依存して確定的に発生するばらつきで、チップの縦方向のみに僅かな周期性（周期：約  $240\mu\text{m}$ ）を持っていました。このような周期性を持つ確定的なばらつき成分が存在することは、今回の研究で初めて明らかとなりました。

大域的成分とは、チップ内で緩やかに変動する成分で、チップごとに分布は異なりますがばらつき量自体は僅かです。ランダム成分は位置相関のない正規分布をしており、原子レベルの揺らぎによって発生する成分と考えられます。各成分の標準偏差は、確定的成分が0.68%、大域的成分が0.01%、ランダム成分が1.36%でした。ランダム成分が最も支配的ですが、確定的成分も無視できません。180nm や 65nm プロセスにおいても同様の評価を行い、確定的成分が存在することを確認しました。現在、より詳細な要因分析を行っています。なお、ウェハー内でのチップ間ばらつき量は、その標準偏差が平均発振周波数の3.2%でした。チップ間のばらつきを製造後に補償する技術についても検討をすすめており、製造が容易でばらつきに強靱な回路の実現に向けた取組を推進しています。

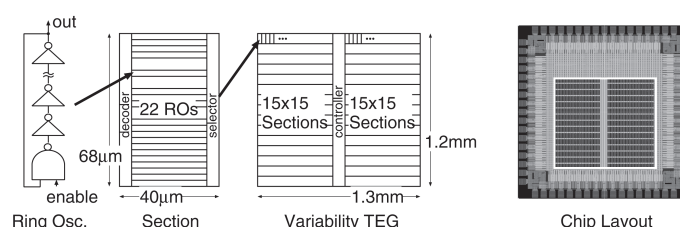


図1. ばらつき評価用テスト回路

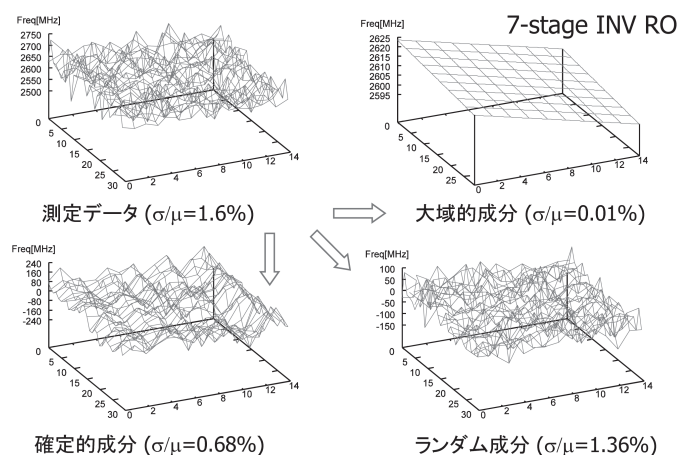


図2. チップ内ばらつきの実測値および成分分離結果

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室）

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「仮想空間中での力覚情報の再現に関する研究」

近年バーチャルリアリティ（VR）技術において、視覚や聴覚だけでなく、触覚に関する情報の扱いが重要視されている。医療分野においては、手術シミュレーションや触診シミュレーションなどにおいて、触覚情報の利用により実際と同様の施術行為が可能になると期待される。

VR 技術による触覚情報の提示は、従来ばねモデルなどに対して経験的にパラメータを設定し、実空間と類似した情報提示を実現する場合が多く見られる。この際、実際の触覚情報は忠実には再現されず、あるいは忠実に再現されたか否かの評価が行われていない。しかし、触診シミュレーションのような課題については、実物体から得られる 3 次元的な触覚情報を、計測に基づいて忠実に再現することが求められる。我々は、対象物体の能動的な操作により得られる反力の知覚（力覚）情報を、忠実に再現する手続きについて検討を進めている。

能動操作における力覚情報を仮想空間中で忠実に再現するために、我々は（1）実物体からの反力分布の計測手続きの確立と計測装置の構築、（2）計測反力情報を用いた仮想物体からの力覚情報の記述法の確立、（3）仮想物体の操作に対するリアルタイムでの反力情報の提示法の確立、の 3 点を必要な検討課題と考え研究を進めている。この際、手法の妥当性を評価するためには（4）心理物理学的な基準による、実物体と仮想物体とからの力覚情報を比較する手続きの確立が不可欠となる。また（4）と関連して、（5）能動操作における対象物知覚の機序の解明も進める必要がある。

（1）について、我々は実物体表面からの反力分布を自動的に計測するシステムを構築している [1]。本システムでは、レンジセンサにより物体表面形状を獲得し、位置センサとして用いるハプティックデバイスと力覚センサを、ロボットアームにより物体表面で操作することで、計測の自動化を実現する。光学カメラが実空間での光学的な分布を記録するのに対し、本システムは 3 次元的な力覚情報の分布を記録することから、我々はこれを 3 次元力覚カメラと呼んでいる。

（2）（3）については、位置・速度 6 次元空間中で計測反力データ群を Radial Basis Function により補間することで反力分布を記述し、この空間中で格子状に配置した参照点群を用いて、仮想物体の操作位置に対する反力を高速に算出し提示する手法を提案している [2]。現在は、対象物体の表面形状情報を用いてこの手法の精度向上を図る手続きについて検討中である。

（4）（5）に関し、能動触の知覚特性を解析する手続きとして、従来は形状や硬さなど対象物の性質と知覚との関係を解析することが多く行われている。しか能動操作に変動は不可避であり、従来手続きはこの点を十分考慮していない。我々は、能動触において人が直接獲得する刺激として、位置情報および反力情報の軌跡を記録し、これらと知覚との関係を解析する手続きについて検討を進めている [3]。

#### 参考文献

- [1] 水田，國川，松田，日本バーチャルリアリティ学会大会第 13 回論文集（2008）
- [2] 大牟禮，水田，松田，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.13, No.1（2008）
- [3] 藤森，水田，松田，電子情報通信学会技術研究報告 HIP2006-47（2006）

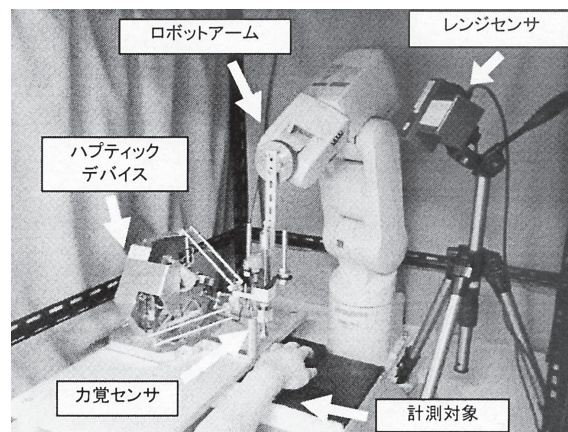


図 1 3 次元力覚カメラの外観



## エネルギー社会・環境学講座 エネルギー情報学分野

<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>

## 「原子力発電所におけるヒヤリハット活動の活性化手法の提案と実践」

原子力発電所で安全意識の高揚・事故防止のために行われている取り組みの1つに、ヒヤリハット活動がある。ヒヤリハット活動とは、事故に至る前に未然に防ぐことができた事例、いわば事故未満の事例を収集し、そこから事故防止に役立つ教訓を取り出す活動である。通常のヒヤリハット活動は参加者が実際に集まって顔を合わせて行うものであるが、この方法では地理的に分散した複数の発電所間での事例や教訓の共有が難しい。また、ヒヤリハット活動が有効に行われるには、多くの事例が収集され、事例に関する活発な議論が行われる必要があるが、現在は必ずしも活発に行われているわけではない。

そこで、当研究室では、ICTを利用して場所を問わずヒヤリハット活動が可能なソフトウェア“ヒヤリハット共有システム”を開発した。このシステムは、ヒヤリハット事例を出来事や要因等で構成するツリーで見やすく視覚化する機能（図1）、良いコメントを評価する機能を備えた電子掲示板、議論への参加が“貢献ポイント”として提示される機能など、議論を活性化するための機能を備えている。また、このシステムを用いて匿名の参加者が5名程度のグループでヒヤリハット事例の登録と自分たちで登録した事例に関する議論を行うヒヤリハット活動を提案した。この活動には、掲示板の議論を活性化させるため、事例に関して積極的に質問することを特に要請された参加者である“積極的参加者”を導入している。

提案したヒヤリハット活動が実際に実施可能であることの確認と、ヒヤリハット活動を活発にする要因、逆に停滞させる要因を明らかにすることを目的に、現在原子力発電所で働いている現場監督6グループ30名にシステムを用いたヒヤリハット活動を行ってもらった。その結果、3つのグループは活発に活動が行われたが、残り3つのグループは活動が停滞する結果となった。（図2）。活発だったグループと活発でなかったグループの比較・分析から、(1) 参加者が自分自身の手で登録した事例は掲示板の議論が返答の連鎖によって盛り上がる傾向があるが、実験者が用意した事例の掲示板の議論は盛り上がらない傾向があること、(2) 活発だった一部グループの掲示板投稿の内容が積極的参加者によって導かれたものであったことが明らかとなった。

今後、さらに活動を活発にする要因の分析をすすめ、得られた知見をまとめて、ヒヤリハット活動を促進する手法を提案すること、そしてその手法を実際の現場で評価することを目指している。

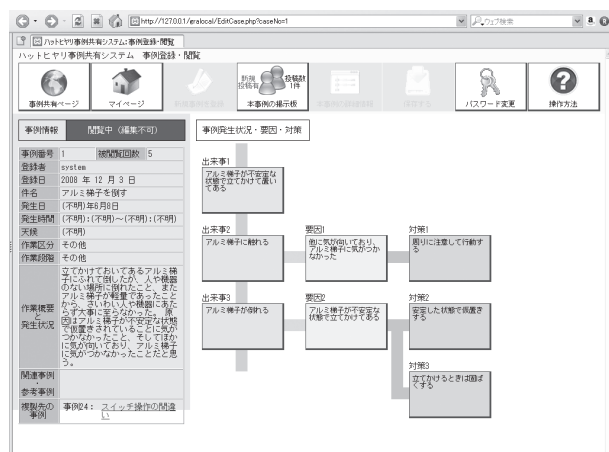


図1 ヒヤリハット事例の視覚化機能

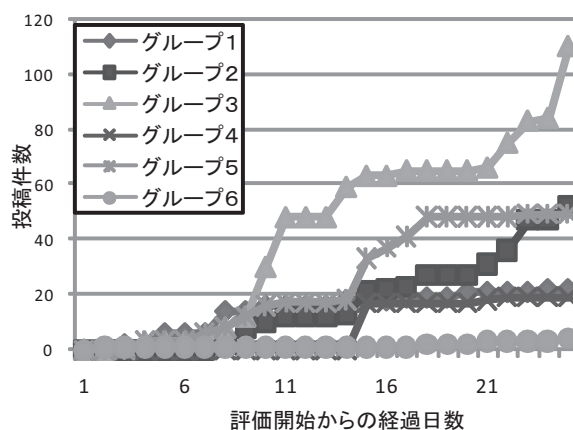


図2 各グループの掲示板投稿数（累積）



## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

### 「微小電力注入による分散電源の導入された配電系統の動特性推定」

1. はじめに 近年、電力事業の自由化により種々のタイプの分散型電源が配電系統に導入され、その数は今後ますます増加すると考えられ、動的な負荷と相俟って系統安定度に影響を与えることが懸念されている。従来は、偶発的な系統事故や負荷脱落などのイベントでの情報をもとに、静的な負荷特性を推定することが主であったが、先述のように複雑化する配電系統の連系状況や運転状態については負荷系統の動特性を系統的に把握する方法が求められている。

2. 提案手法 当研究室では系統に微小な既知の電力を注入し、それに対する系統の動揺を解析することで配電系統の動特性を測定し、システム同定手法を適用して系統の運転状態を推定する手法を提案している。ここでは、まず単純な例として、分散型電源として同期発電機が導入されている配電系統（図1）について、運転状態を推定できるかどうかを検証した。実験では、変電所の母線に微小電力擾乱を注入し、測定された応答波形から母線以下の系統の負荷構成を推定することを想定し、注入装置と応答波形の測定点CB2を母線1に設置した。注入時に生じる電圧変動の大きさが通常時の2%以内に収まるように設定した。注入するP,Qは同時制御されており、系統の動揺が注入信号に影響を与えないようにしてある。図2は注入電力Psm（最下段：Chirp信号：0.5Hz/60sec.）と測定点でのP,Q,Vである。たとえば、入力をPsm、出力をQcb2としてシステム同定手法で伝達関数を求め、ボード線図として示したのが図3である。同期機が連系されたCase 1-2は連系されていないCase 0-1に比べて明らかな周波数特性を示しており、提案手法が負荷系統全体の動特性推定につながる可能性を示している。

3. まとめ この他、連系された機器の種類やその機器が全体の負荷容量に占める割合の推定につながる結果が得られた。今後は、インバータ機器などを含む系統についても検討をすすめる予定である。

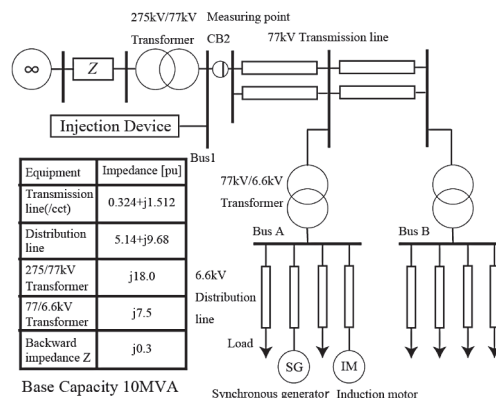


図1 例題負荷系統

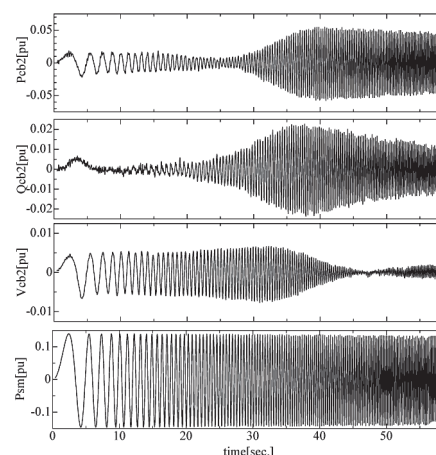


図2 系統応答の例 (Case1-2)

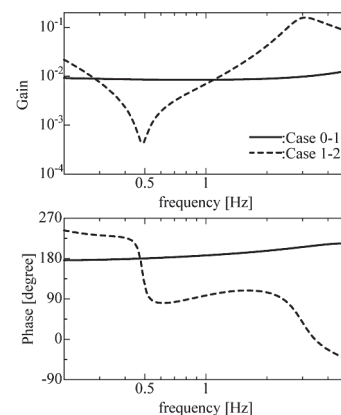


図3 同定伝達関数のボード線図

エネルギー理工学研究所エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野（佐野研究室）  
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/ksoshiki/complex.html>  
 「高温プラズマ閉じ込め磁場ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化」

日本の原子力委員会は平成 20 年 7 月に、地球温暖化対策に貢献する原子力ヴィジョンを策定し、その中で核融合炉を 21 世紀中葉までに、その実用化の目処を得るように求めている。また洞爺湖サミットにおいては、2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量の半減を目指すことが採択された。省エネルギーとともに、CO<sub>2</sub> を排出しない核融合炉を含めた新たなエネルギー源の開発が急務となっている。

現在、国際熱核融合実験炉（ITER）などの核融合炉開発をとりまく世界的動向のなかで、エネルギー理工学研究所エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野では、先進ヘリカル型核融合炉開発の一環として、附属エネルギー複合機構研究センターと協力し、トカマク型原型炉の先に展開される次世代高温プラズマ閉じ込め磁場として期待されるヘリカル軸ヘリオトロンの新概念開発研究を推進している。

ヘリカル軸ヘリオトロン（ヘリオトロン J）の磁場構造は、これまでのヘリオトロン E の平面磁気軸ヘリオトロンと異なり、磁気軸の立体化を導入し、そこで発生するバンピー磁場を活用した良好な粒子閉じこめと閉じ込め磁場の全領域の磁気井戸の構築による電磁流体力学的（MHD）安定性との高次の両立性を図ることに特徴がある。準等磁場配位を指導原理とする閉じ込め改善の実現と磁場最適化の物理原理の探索を目標として行われてきたヘリオトロン J 実験から得られた代表的な知見として、以下が挙げられる。

- (1) 閉じ込め損失は新古典論の衝突輸送の予測より遙かに大きい。異常輸送は Bohm 型ではなく gyro-Bohm 型である（次元解析から collisional high- $\beta$  model のプラズマ揺動輸送と矛盾しない）。トカマク損失におけるプラトー比例則（L-G 則）の回転変換角依存性との類似性が指摘される。
- (2) ヘリオトロン J 閉じ込めと国際ステラレータ比例則（ $\tau_E^{\text{ISS04}}$ ）との比較研究、とくに規格化装置ファクター（ $f_{\text{ren}}$ ）の特性（ $\tau_E^{\text{ISS04}} = f_{\text{ren}} 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{0.54} B^{0.84} I^{0.41}$ ）に係わる研究が進展した。規格化装置ファクター（ $f_{\text{ren}}$ ）の実効リップル率（ $\varepsilon_{\text{eff}}$ ）依存性が強く示唆される（新古典輸送最適化と異常輸送最適化の協働の可能性）。一方、比較的大きな測定値（閉じ込め時間）のデータのばらつきは、比例則に現れていない未知の物理パラメータの存在を強く示唆している。
- (3) 規格化装置ファクターは閉じ込めのモード遷移（L-H 遷移）で増加する。H-mode 発現領域は、磁気面のラベルとして用いられた真空磁気面の周辺回転変換角に依存し、主たる低次の有利面よりわずかに離れた回転変換角で比較的高い閉じ込め改善度が得られている。閉じ込め改善時に最外殻磁気面（LCFS）近傍で、負の径電場（ $E_r < 0$ ）形成が観測される。L-H 遷移時の LCFS の閉じ込め性能は、SOL の揺動輸送の確率分布関数の測定から、間欠的輸送（intermittent transport）の減少と強い相関がある。最近、高速カメラによる接線ポートからの周辺プラズマ領域におけるフィラメント状揺動の磁場に垂直方向の回転方向が、L-mode と H-mode で逆転する現象が見出され、電場構造変化が強く示唆されるに至った。

ヘリオトロン J 実験は上記以外に、電子サイクロトロン電流駆動（ECCD）の研究、中性粒子ビーム入射（NBI）加熱プラズマの研究、イオンサイクロトロン周波数帯加熱（ICRF）プラズマの研究、超音速分子ビーム入射（SMBI）による粒子補給の研究が進展している。今後、核融合科学研究所の LHD 研究との連携（双方向型共同研究）を一層強め、次世代コンパクト・高ベータ・ヘリカル物理・工学設計の提示につなげたいと考えている。

# 生存圏研究所 中核研究部 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野（津田研究室）

[http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda\\_lab](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab)

## 「電波や光を用いたリモートセンシング手法の森林大気相互作用の観測への展開」

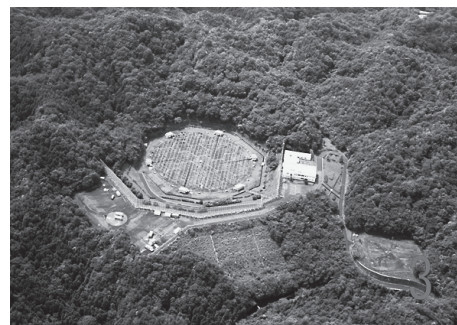
地球陸面上の多くの部分を占める森林と大気とのエネルギーや大気微量物質の授受は我々の住む地表付近の大気環境や地球温暖化などの気候変動にも重要な影響を与えています。森林の樹木が光合成により土壌の水を吸い上げて大気中に蒸散することで、森林にもたらされる降水の約半分が大気に戻されます。森林に降り注ぐ太陽放射エネルギーの一部はこの光合成活動に使われることから、森林は地面付近の気温変動にも影響を与えています。さらには、光合成、呼吸に伴う二酸化炭素や土壌中の微生物の生化学反応によるメタン等の地球温暖化に関わる微量物質のやり取りも行われています。

従来、森林大気相互作用の観測は森林中に設置したタワーによる直接測定が行われてきました。これは 10Hz 程度の高い観測頻度で風速、気温、水蒸気、二酸化炭素等を測定してエネルギーや微量物質の鉛直方向のやり取り（フラックス）を観測するものです。しかしながら、森林生態系は、樹種、樹齢構成、土壌状態などが一様ではなく、一点観測であるタワー観測では観測の代表性が問題となることが指摘されています。また、山間部の森林に吹く斜面流がフラックス観測の誤差となることも知られています。

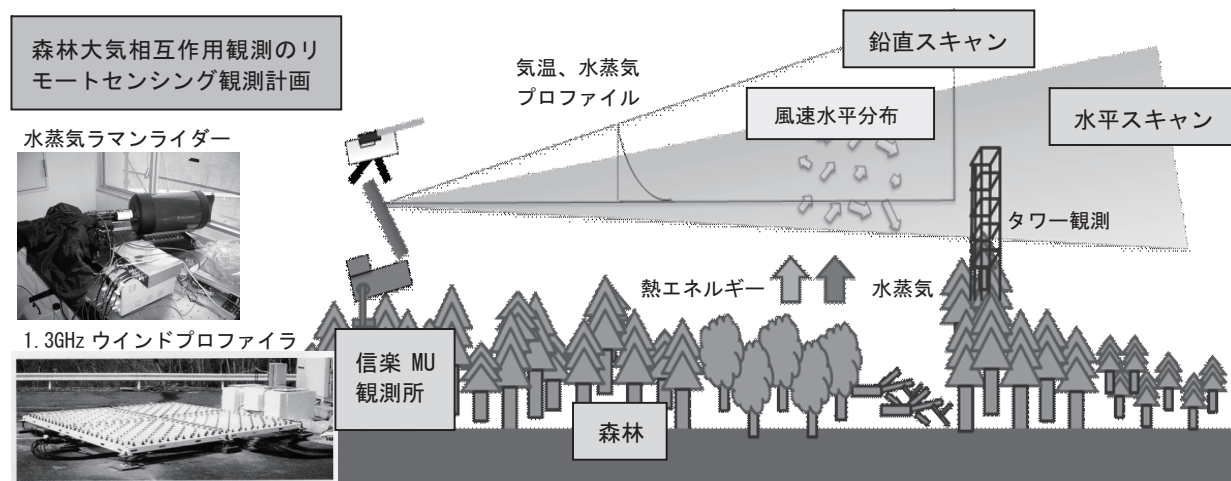
森林が大気に及ぼす影響を正確に診断するには森林直上の大気を面的にカバーする観測が重要です。このため本研究室では生存基盤研究ユニットと協同して、大気の鉛直方向観測を行うリモートセンシング技術を水平方向の観測に適用して、森林上空の面的な大気観測を実現し温度、水蒸気等のフラックスを測定する研究を進めています。

滋賀県甲賀市信楽町に位置する京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所では、大型 VHF レーダーである MU レーダーを中心として、境界層レーダーやライダーなど様々な大気観測が行われています。本観測所が森林に囲まれた環境であることを利用し、観測所から森林に向けたレーダー、ライダーの水平観測を実現し、森林直上の大気を観測する研究を行っています。

具体的には 1.3GHz 帯ウインドプロファイラのアンテナを傾けて設置し、水平、鉛直スキャンを行うことで風速の立体構造を得ます。さらに、レーダーに音波発射源を組み合わせる気温観測手法である RASS の観測も水平方向に行い、これから森林大気間の熱エネルギーフラックスを導出します。また、可搬型ラマン・ライダー装置を同時稼働し、水蒸気の立体構造を得てそれから水蒸気フラックスを導出します。また、GPS 受信機を森林中に複数設置することで水蒸気の空間分布を得る GPS トモグラフィー観測にも取り組んでいます。これらの新しい観測により従来のタワー観測では捉えきれなかった森林大気に及ぼす作用の理解が大きく進展することが期待されます。



森林に囲まれた信楽 MU 観測所





生存圏研究所中核研究部 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>  
 地球磁気圏放射線帯変動の研究

地球を取り巻く宇宙空間には、地球磁場によって捕捉された高エネルギー粒子が放射線帯（バン・アレン帯）を形成しています。この放射線帯は低軌道から静止軌道の間に存在しており、ここを通過する衛星の太陽電池パネルや半導体電子機器は、この放射線の影響を受けて劣化するなど、様々な障害を起こします。太陽表面でフレア現象が起こり太陽風の磁場が大きく変動すると、地球の磁気構造も乱されて（磁気嵐）、宇宙放射線環境は大きく変動します。放射線環境の変動は、有人宇宙活動及び宇宙機器に悪影響を及ぼすのみならず、電離層への降込み粒子の変動を通じて超高層大気が加熱され低高度の衛星の軌道に影響を与えるドラッグが発生します。本研究では、放射線帯の相対論的エネルギー（数 MeV）電子の生成機構およびオーロラ域への降下粒子のフラックスを、計算機実験によって定量的に評価し、観測データとの比較・検証を通じて、放射線環境の変動を定式化し、磁気嵐の発生後の放射線環境の変動を予測する手法を確立することを目指しています。

最近の研究では、VLF 帯のホイッスラーモード波と相互作用する電子が相対論的エネルギーまで極めて効率良く加速される過程が存在することを発見しました（図 1）。この加速過程は地球の内部磁気圏の磁気赤道付近からホイッスラーモード波が伝搬してくる時に、それとは反対に磁気赤道に向かう電子が加速されつつ進行方向を変えて大幅に加速されることから Relativistic Turning Acceleration (RTA) と名付けました [1]。地球の磁場が乱されて、地球の内部磁気圏に 10 ～ 100keV の電子が注入されると、周波数が大きく上昇するコーラス放射という電波が発生します。この電波の発生機構は 50 年来の謎でしたが、これを計算機実験で再現することに成功し [2]、その理論解析を通じて、コーラス放射と同時に RTA により電子の一部が MeV のエネルギーまで加速され、地球の放射線帯が形成されることが明らかになってきました。

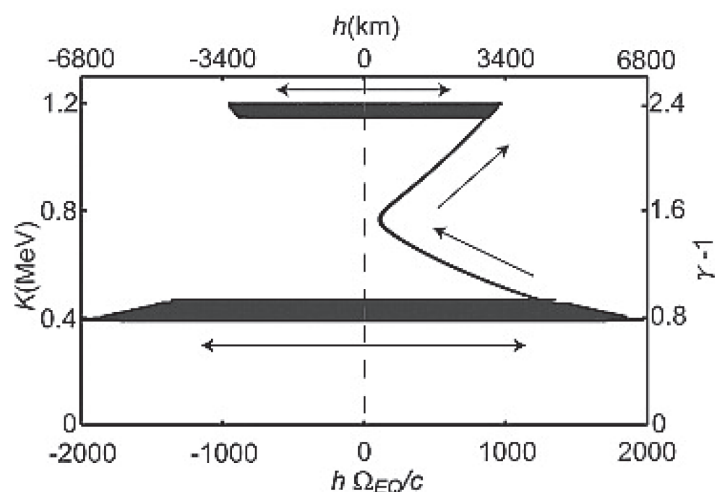


図 1 ホイッスラーモード波による相対論的電子加速

#### 参考文献

- [1] Y. Omura, N. Furuya, D. Summers, Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler-mode waves in a dipole magnetic field, *Journal Geophysical Research*, Vol. 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243, 2007.
- [2] Y. Omura, Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.



## ネットワーク研究部門ネットワーク情報システム研究分野（中村研究室）

<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>

### 「ユーザの状態に適応した支援を行うためのインタラクションモデル」

数え切れないほどの情報システムが人間の日常生活を支援する状況では、人間がその存在を意識することなくその恩恵を享受できる環境が必要となる。システムは人間の自然な振る舞いからその要求を認識し、自律的に支援をすることが期待されるが、支援を一方的に押しつけたり、ユーザの主体性や意欲を削ぐことがないようにしなければならない。例えば、福祉などの分野では、過剰な支援で残存機能を退行させてはならない。このような支援を実現するためには、ユーザの意図・興味・意欲といった内部状態を推定し、それに応じて支援の内容や方法、タイミングを適切に選択する能力が必要となる。

しかし、ユーザの意図や作業に対する熟練度などといった内部状態には直接的に観測できないものも多く、情報システムがそれを認識することは容易ではない。人間が支援を行う場合には、相手の表出する様々な情報を用いて被支援者の内部状態を推測し、また、様子を見るだけでは推測が難しい場合には、被支援者に積極的に働きかけることによって情報の表出を促している。我々は、このような、マルチモデル且つプロアクティブな認識を実現するための方法論を探り、適切な支援を提供する情報システムを実現することを目指している。

そのためのモデルの一つとして“Interaction Reproducing Model (IRM)”を提案した（図1）。そのキーアイデアは、ユーザと熟練した支援者の間で行われる外部に表出された振る舞い（インタラクション）をモデル化することである。このモデルは、人間のオペレータの操作による理想的なインタラクションのパターンを有限状態機械として学習しておくものであり、支援時には、現在行われているインタラクションが学習済みのどのインタラクションパターンに最も近いかを判断し、そのパターンを基にシステムを動作させることで適切な支援を実現する。

このモデルを調理支援システムや教示システムに用いた実験では、ユーザの調理技術や、講義に対して感じている難易度や興味の度合いに応じて指示や教示内容を調節することが可能であり、ユーザに良い印象を与えることが確認された（図2）。認識率の向上など改善すべき点は多いが、将来的には家庭やオフィス、自動券売機やATMのように公共の場所などで広く使われる枠組みとなることを期待している。

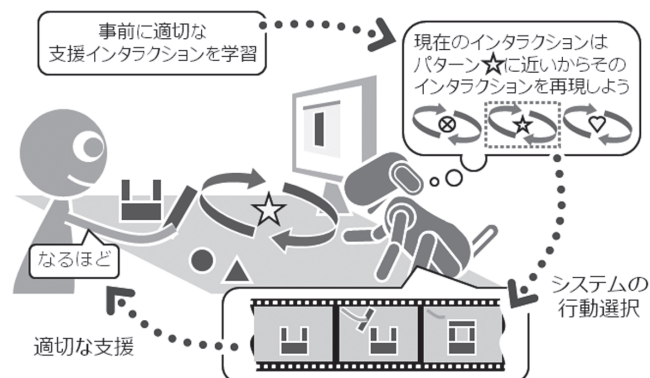


図1. Interaction Reproducing Model 概略



図2. 実験風景